

# نسبت تغییر مکان غیرالاستیک برای سازه‌های در معرض زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک

نعمت حسنی<sup>۱\*</sup>، غلامرضا قدرتی امیری<sup>۲</sup>، مجید برارنیا<sup>۳</sup>، فریدون سیناییان<sup>۴</sup>

۱- استادیار، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

۲- استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی دکترا، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

۴- استادیار، مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان

nemathassani@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۳۰

**چکیده-** در این مقاله، نتایج به دست آمده از بررسی آماری نسبت تغییر مکان غیرالاستیک سازه‌های در معرض زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک ارائه شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای ارزیابی تغییر مکان غیرالاستیک نیاز سازه‌هایی با سختی و مقاومت جانبی مشخص در زلزله‌های حوزه نزدیک استفاده شود. نسبت تغییر مکان غیرالاستیک از پاسخ سامانه‌های یک‌درجه آزادی با ۶ سطح از ضریب کاهش مقاومت، در معرض ۶۱ رکورد حوزه نزدیک پالس‌گونه به دست آمده است. اثر نرمال کردن دوره تناوب با دوره تناوبی که در آن بیشترین مقدار تغییر مکان طیفی رخ می‌دهد، ضریب کاهش مقاومت، پریود همراه پالس سرعت  $T_p$ ، بزرگا و فاصله زلزله، میزان سخت‌شوندگی بعد از جاری شدن و رفتار هیستریسیس سازه، روی نسبت تغییر مکان غیرالاستیک، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد در دوره تناوب‌های کم، کاهندگی سختی و مقاومت باعث افزایش تغییر مکان غیرالاستیک نیاز می‌شود. سرانجام یک رابطه جدید برای محاسبه میانگین نسبت تغییر مکان غیرالاستیک سازه‌ها در زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک پیشنهاد شده که تقریب بسیار خوبی برای محاسبات دارد.

**واژگان کلیدی-** زلزله‌های حوزه نزدیک، پالس‌گونه، نسبت تغییر مکان غیرالاستیک، تغییر مکان نیاز، کاهندگی سختی

## ۱- مقدمه

تعیین شده، برسد. تغییر مکان هدف در این روش براساس تغییر مکان بیشینه غیرالاستیک در سامانه یک‌درجه آزادی به دست می‌آید. برای نمونه، در روش تحلیل پوش‌آور که در FEMA 356 [۱] و FEMA 450 [۲] به آن‌ها اشاره شده است، تغییر مکان هدف در بام، براساس روشی که به آن روش ضریب تغییر مکان می‌گویند به دست می‌آید. در روش

امروزه در کارهای مهندسی سازه برای ارزیابی نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها از روش‌هایی همانند تحلیل پوش‌آور و تحلیل پوش‌آور مودال استفاده می‌شود. در این روش‌ها نیروی جانبی وارد شده به سازه به گونه‌ای فزاینده افزایش می‌یابد تا تغییر مکان نقطه مشخص در سازه (بام) به مقدار

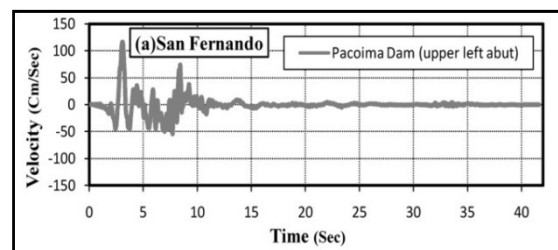
براساس تحقیقات Baez و Miranda [۱۱]، نسبت تغییرمکان بیشینه غیرالاستیک به تغییرمکان بیشینه الاستیک برای سازه‌های با مقاومت ثابت ( $C_R$ )، در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های معمول در پیوندهای ۰/۱ تا ۱/۳ ثانیه معمولاً بیشتر است. همچنین ایشان به این نتیجه دست یافتند که بیشترین سرعت فزاینده یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر این نسبت است. بیشترین سرعت فزاینده عبارت است از بیشترین سطح زیر نمودار تاریخچه زمانی شتاب، در میان دو نقطه، که نمودار شتاب، خط مبنا (محور زمان) را قطع می‌کند.

Chintapakdee و Chopra [۵] برای ۱۵ رکورد زلزله حوزه نزدیک عمود بر راستای گسل، نسبت تغییرمکان بیشینه غیرالاستیک به الاستیک را به دست آوردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که میانه  $C_R$  و نسبت تغییرمکان بیشینه غیرالاستیک به الاستیک در سازه‌های با شکل پذیری ثابت،  $C_{II}$ ، برای زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های معمول در ناحیه حساس به شتاب با هم متفاوت است. اما زمانی که این نسبت‌ها را در برابر پیوند نرمال شده به  $T_C$  (پیودی که ناحیه حساس به شتاب را از ناحیه حساس به سرعت جدا می‌کند) رسم کردند، این تفاوت کاهش پیدا کرد و دو مقدار بسیار به هم نزدیک شدند.

Akkar و همکاران [۱۲] با در نظر گرفتن ۵۶ رکورد حوزه نزدیک،  $C_R$  را برای سازه‌های بدون کاهندگی و با کاهندگی سختی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که  $T_p$  در زلزله‌های حوزه نزدیک اثر مهمی بر بیشینه تغییرمکان غیرالاستیک سازه‌ها دارد و نسبت  $C_R$  در بازه‌ی دوره تناوب‌های کمتر از  $0.7/T_p$  افزایش دامنه‌ی چشم‌گیری دارد؛ به گونه‌ای که این میزان با افزایش ضریب کاهش مقاومت، افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین اثر کاهندگی سختی در نسبت  $C_R$  را بررسی کردند و به این نتیجه

ضریب تغییر مکان،  $C_1$  به صورت ضریب اصلاح برای نسبت دادن تغییرمکان بیشینه غیرالاستیک به الاستیک خطی، تعریف می‌شود. یکی از مراحل اصلی این روش، محاسبه تغییرمکان بیشینه غیرالاستیک با استفاده از نسبت گفته شده است که اجازه می‌دهد تغییرمکان بیشینه غیرالاستیک براساس تغییرمکان بیشینه الاستیک محاسبه شود.

زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه که به‌خاطر جهت‌گیری رخ می‌دهد، نوع خاصی از زمین لرزه‌ها است که امروزه برای توصیف آن‌ها تحقیقات بسیاری انجام شده است. این زمین لرزه‌ها براساس پالس موجود در تاریخچه زمانی سرعت، در راستای عمود بر راستای گسل توصیف شده و معمولاً در فاصله کمی از گسل روی می‌دهند (شکل شماره ۱). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های زلزله‌های پالس‌گونه، پیوند همراه پالس سرعت است که به صورت  $T_p$  نشان داده شده و می‌توان آن‌را با تقریب خوبی پیودی دانست که طیف پاسخ سرعت در آن به بیشترین مقدار خود می‌رسد [۳] [۴].



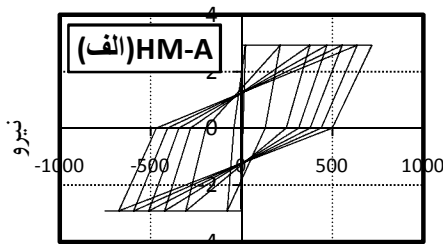
شکل (۱) تاریخچه سرعت برای رکورد پالس‌گونه در زلزله

San Fernando با بزرگای ممان ۶/۶ و  $T_p$  ۱/۶ ثانیه

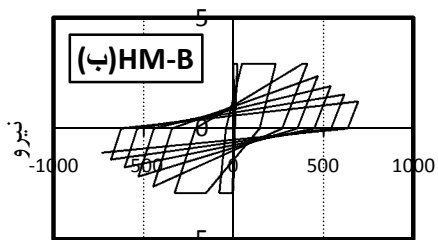
در سال‌های نزدیک تحقیقات گسترده‌ای روی نسبت تغییرمکان غیرالاستیک برای زلزله‌های بدون پالس انجام شده است که نتایج آن‌ها در مقالات [۵] و [۱۰] و گزارش‌های گوناگون به چاپ رسیده است؛ اما برای زلزله‌های پالس‌گونه، این تحقیقات کمتر و محدودتر است که در ادامه به آن‌ها می‌پردازیم.

## ۲- روش پژوهش و سامانه‌های سازه‌ای مطالعه شده

نسبت تغییرمکان غیرالاستیک  $C_R$  براساس تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرالاستیک روی سازه‌های یک درجه آزادی با دوره تناوب‌های گوناگون و میرایی ۵ درصد به دست آمده است. سازه‌های مطالعه شده رفتار هیستریسیس الاستوپلاستیک کامل داشته و هر یک ضریب کاهش مقاومت برابر با ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱/۵ دارد. برای هر یک از رکوردهای زلزله و هر ضریب کاهش مقاومت،  $C_R$  برای ۱۲۰ دوره تناوب به دست آمده است. برای ارزیابی‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی از نرم‌افزار USDP [۱۴] استفاده شده است. برای بررسی اثر رفتار هیستریسیس روی  $C_R$ ، سه نوع مدل رفتاری زیر به کار رفته است:



تغییر مکان



تغییر مکان

شکل (۲) رفتار چرخه‌ای مدل‌های کاهندگی استفاده شده در پژوهش. (الف) مدل کاهندگی سختی کلاف، (ب) مدل کاهندگی سختی و مقاومت کلاف

(۱) رفتار دو خطی برای نشان دادن رفتار سازه‌هایی که کاهندگی مقاومت و سختی در آن‌ها رخ نمی‌دهد، (۲) مدل

رسیدند که تغییرمکان غیرالاستیک نیاز در زلزله‌های حوزه نزدیک پالس گونه در سازه‌های با کاهندگی سختی با دوره تناوب‌های کمتر از  $0.5T_p$ ، افزایش می‌یابد.

Ruiz-García [۱۳] با استفاده از ۴۰ رکورد زلزله حوزه نزدیک پالس گونه،  $C_R$  در سازه‌های بدون کاهندگی و با کاهندگی سختی و مقاومت را مطالعه کرد. او به این نتیجه رسید که بیشینه سرعت زمین لرزه تأثیر چندانی بر نسبت تغییرمکان غیرالاستیک ندارد؛ همچنین در سازه‌های دارای کاهندگی مقاومت و سختی، با افزایش میزان کاهندگی در دوره تناوب کمتر از  $T_g$  (دوره تناوب مرتبط با بیشترین مقدار سرعت طیفی در طیف با میرایی ۵ درصد)، تغییرمکان غیرالاستیک نیاز افزایش می‌یابد. ایشان رابطه‌ای برای برآورد  $C_R$  ارائه کرد که میزان خطای میانگین آن در دوره تناوب‌های کمتر از  $0.5T_g$  (تقریباً ۲۰ درصد) است.

در این پژوهش نتایج مطالعات آماری گسترده روی نسبت تغییرمکان‌های بیشینه غیرالاستیک به الاستیک سامانه‌های یک درجه آزادی با مقاومت ثابت، در زلزله‌های پالس گونه حوزه نزدیک ارائه می‌شود. سعی بر آن بوده تا با افزایش رکوردهای مطالعه شده دقت نتایج افزایش یابد. مباحثی که بررسی شده عبارت است از: تأثیر دوره تناوب نوسانگر، دوره تناوبی که بیشترین تغییرمکان طیفی در آن رخ می‌دهد ( $T_D$ )، ضریب کاهش مقاومت، پیروود همراه پالس سرعت ( $T_p$ )، میزان سخت‌شوندگی بعد از جاری شدن و رفتار هیستریسیس سازه. افزون بر موارد گفته شده، تأثیر بزرگا و فاصله از گسل نیز بررسی شده است. رابطه پیشنهاد شده مولفین برای نسبت تغییرمکان غیرالاستیک را می‌توان برای ارزیابی لرزه‌های سازه‌های در معرض زلزله‌های پالس گونه حوزه نزدیک استفاده کرد. این رابطه در مقایسه با روابط ارائه‌شده در تحقیقات گذشته دارای خطای میانگین کمتر و دقت بیشتری است.

بارگذاری تعریف کرد. در این پژوهش از مدل کاهندگی کلاف استفاده شده است که کاهندگی سختی در این مدل براساس رابطه ۱ بیان و کاهندگی مقاومت آن به صورت معادله ۲ ارائه شده است:

$$f_x(i) = \beta_a \cdot f_x(i-1) \cdot \left(1 - e^{-\beta_b \cdot n \cdot \frac{u_x}{u_y}}\right) \quad (2)$$

$f_x(i)$  بیشترین مقاومت بعد از کاهندگی،  $f_x(i-1)$  بیشترین مقاومت قبل از کاهندگی،  $u_x$  بیشترین تغییرمکان،  $n$  تعداد سیر یا گردش و  $\beta_a$  و  $\beta_b$  پارامترهای کاهندگی مقاومت است. در شکل ۲-ب، نمونه‌ای از رفتار چرخه‌ای این مدل در اثر یک بارگذاری متناوب دیده می‌شود. برای سازه‌های دارای کاهندگی مقاومت و سختی، مقدار  $\lambda$  برابر  $0.4$  و مقادیر  $\beta_a$  و  $\beta_b$  به ترتیب  $0.75$  و  $0.25$  انتخاب شده است [۱۵].

### ۳- رکوردهای انتخاب شده

۶۱ رکورد زلزله حوزه نزدیک پالس‌گونه عمود بر راستای گسل مسیب، براساس ویژگی‌های داده شده در مرجع شماره ۱۷ (Baker J.W) انتخاب شده است. رکوردهای انتخاب شده این ویژگی‌ها را دارند: ۱) زلزله‌های با بزرگای ممان ( $M_w$ ) بیش از ۶ برگزیده شده و ۲) کوتاهترین فاصله محل ثبت رکورد تا سطح گسیختگی، کمتر از ۲۰ کیلومتر باشد. پیوند همراه پالس سرعت براساس مرجع شماره ۱۷ (Baker, J.W) در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، جزئیاتی مانند: نام زلزله، نام ایستگاه، کمترین فاصله تا سطح گسیختگی (ClstD)، بیشترین سرعت زمین‌لرزه، بیشترین شتاب زمین‌لرزه، پیوند همراه پالس سرعت ( $T_p$ ) و دوره تناوب مرتبط با بیشترین مقدار سرعت طیفی ( $T_g$ ) و تغییرمکان طیفی ( $T_D$ ) با میرایی ۵ درصد، مربوط به رکوردهای انتخابی، ارائه شده است.

کاهندگی سختی کلاف (HM-A)، ۳) مدل کاهندگی مقاومت و سختی کلاف (HM-B) [۱۵]. مدل‌های کاهندگی انتخابی به‌خاطر سادگی و کارامدی آن‌ها نسبت به مدل‌های رفتاری سایر مراجع [۱۶] در نظر گرفته شده است. مدل‌های رفتاری ۲ و ۳ رفتار چرخه‌ای در سازه‌های بتن آرمه را نشان می‌دهد که با کاهش مقاومت و سختی همراه است و در مورد آن‌ها توضیح داده خواهد شد.

### ۲-۱- مدل کاهندگی سختی کلاف (HM-A)

این مدل برای نمونه‌هایی استفاده می‌شود که در آیین‌نامه‌های کنونی، طراحی و جزئیات آن به درستی اجرا شده و کاهش سختی ناشی از ایجاد ترک در نمونه بر اثر بارهای متناوب باشد (شکل ۲-الف). در این روش، سختی باربرداری از یک رابطه ساده بین سختی اولیه و شکل‌پذیری پیروی می‌کند که در معادله ۱ آمده است:

$$K_{um} = K_0 \left(\frac{u_y}{u_m}\right)^\lambda \quad (1)$$

$K_0$  سختی اولیه،  $u_y$  تغییرمکان جاری شدن،  $u_m$  بیشترین تغییرمکان غیرالاستیک سازه،  $K_{um}$  سختی باربرداری و  $\lambda$  پارامتر بر مبنای شکل‌پذیری است که مقداری بین صفر تا یک دارد. زمانی که  $\lambda$  مساوی صفر باشد، سختی باربرداری، برابر سختی اولیه است. تحقیقات گوناگونی برای به‌دست آوردن مقدار  $\lambda$  انجام شده [۱۵] و در این پژوهش  $\lambda$  برابر  $0.4$  در نظر گرفته شده است.

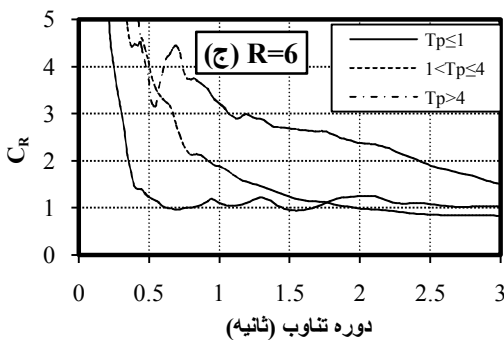
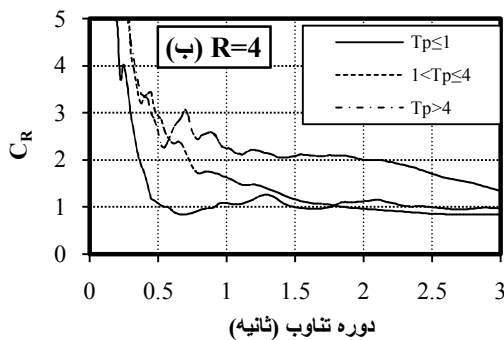
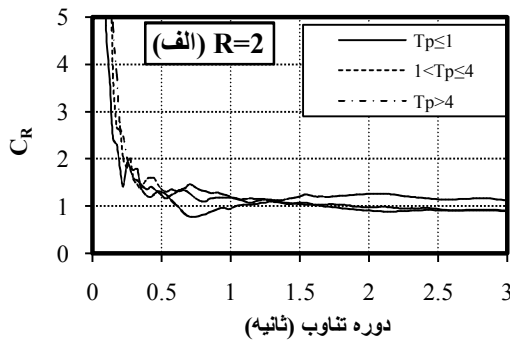
### ۲-۲- مدل کاهندگی سختی و مقاومت کلاف (HM-B)

این مدل برای سازه‌هایی استفاده شده است که در بارگذاری‌های متناوب، کاهش سختی همراه کاهش مقاومت رخ می‌دهد. کاهش چرخه‌ای مقاومت را می‌توان به صورت از دست دادن مقاومت جانبی با افزایش چرخه‌های

جدول (۱) مشخصات رکوردهای زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه مورد استفاده شده در این پژوهش

رخداد	سال	ایستگاه	بزرگا	فاصله (km)	PGV (cm/sec2)	PGA (g)	T <sub>p</sub> (sec)	T <sub>g</sub> (sec)	T <sub>D</sub> (sec)
San Fernando	۱۹۷۱	Pacoima Dam (upper left abut)	۶/۶۴	۱/۸۱	۱۱۶/۴۸	۱/۴۳	۱/۶	۱/۳۴	۵/۹۶
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	Aeropuerto Mexicali	۶/۵۳	۰/۳۴	۴۴/۳۲	۰/۳۶	۲/۴۲	۱/۶۴	۱/۶۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	Agrarias	۶/۵۳	۰/۶۵	۵۴/۳۸	۰/۳۱	۲/۳۰	۰/۹۴	۲/۰۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	Brawley Airport	۶/۵۳	۱۰/۴۲	۳۶/۱۲	۰/۱۶	۴/۰۳	۳/۴۲	۴/۶۵
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	EC County Center FF	۶/۵۳	۷/۳۱	۵۴/۴۹	۰/۱۸	۴/۵۲	۳/۷۲	۵/۰۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	EC Meloland Overpass FF	۶/۵۳	۰/۰۷	۱۱۵/۰۴	۰/۳۸	۳/۳۵	۳	۳/۴۲
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #10	۶/۵۳	۶/۱۷	۴۶/۹۲	۰/۱۸	۴/۴۹	۶/۱	۶/۳۲
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #11	۶/۵۳	۱	۴۱/۱۰	۰/۳۷	۷/۳۶	۰/۷۴	۷/۴۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #3	۶/۵۳	۱۲/۸۵	۴۱/۱۰	۰/۲۳	۵/۲۴	۴/۵۸	۵/۴۲
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #4	۶/۵۳	۷/۰۵	۷۷/۹۳	۰/۳۶	۴/۶۱	۳/۶۸	۵/۰۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #5	۶/۵۳	۳/۹۵	۹۱/۴۸	۰/۳۸	۴/۰۵	۳/۴۴	۴/۳۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #6	۶/۵۳	۱/۳۵	۱۱۱/۸۷	۰/۴۴	۳/۸۴	۳/۳۲	۴/۰۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #7	۶/۵۳	۰/۵۶	۱۰۸/۸۲	۰/۴۶	۴/۲۳	۳/۱۸	۳/۷۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Array #8	۶/۵۳	۳/۸۶	۴۸/۵۵	۰/۲۷	۵/۳۹	۴/۲۲	۵/۰۰
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	El Centro Differential Array	۶/۵۳	۵/۰۹	۵۹/۶۱	۰/۴۲	۵/۸۶	۳/۳۸	۵/۸۵
Imperial Valley-06	۱۹۷۹	Holtville Post Office	۶/۵۳	۷/۶۵	۵۵/۱۵	۰/۲۶	۴/۸۰	۴	۵/۰۰
Irpinia, Italy-01	۱۹۸۰	Stumo	۶/۹۰	۱۰/۸۴	۴۱/۵۰	۰/۲۳	۳/۰۹	۲/۳۸	۲/۶۰
Morgan Hill	۱۹۸۴	Coyote Lake Dam (SW Abut)	۶/۱۹	۰/۵۳	۶۲/۳۰	۰/۸۱	۰/۹۵	۰/۷۶	۰/۸۲
Morgan Hill	۱۹۸۴	Gilroy Array #6	۶/۱۹	۹/۸۶	۳۵/۳۹	۰/۲۴	۱/۲۴	۱/۱۴	۱/۲۰
N/ Palm Springs	۱۹۸۶	North Palm Springs	۶/۰۶	۴/۰۴	۷۳/۳۳	۰/۶۷	۱/۳۸	۰/۹۲	۱/۲۶
Superstition Hills-02	۱۹۸۷	Parachute Test Site	۶/۵۴	۰/۹۵	۱۰۶/۷۵	۰/۴۲	۲/۲۸	۱/۹۲	۵/۴۲
Loma Prieta	۱۹۸۹	Gilroy Array #2	۶/۹۳	۱۱/۰۷	۴۵/۶۷	۰/۴۱	۱/۷۲	۱/۵۴	۱/۵۴
Loma Prieta	۱۹۸۹	Saratoga - Aloha Ave	۶/۹۳	۸/۵۰	۵۵/۵۸	۰/۳۶	۴/۴۷	۱/۶۶	۵/۹۸
Erzican, Turkey	۱۹۹۲	Erzincan	۶/۶۹	۴/۳۸	۹۵/۴۲	۰/۴۹	۲/۶۵	۲/۳۴	۲/۵۰
Landers	۱۹۹۲	Lucerne	۷/۲۸	۲/۱۹	۱۴۰/۲۷	۰/۷۱	۵/۱۰	۴/۵	۱۶/۲۸
Northridge-01	۱۹۹۴	Jensen Filter Plant	۶/۶۹	۵/۴۳	۶۷/۴۳	۰/۵۱	۳/۵۳	۲/۹۲	۲/۷۸
Northridge-01	۱۹۹۴	Jensen Filter Plant Generator	۶/۶۹	۵/۴۳	۶۷/۳۸	۰/۵۲	۳/۵۳	۲/۹۲	۲/۷۸
Northridge-01	۱۹۹۴	LA Dam	۶/۶۹	۵/۹۲	۷۷/۱۱	۰/۵۷	۱/۶۵	۰/۹۲	۲/۱۴
Northridge-01	۱۹۹۴	Newhall - W Pico Canyon Rd/	۶/۶۹	۵/۴۸	۸۷/۷۵	۰/۴۳	۲/۴۱	۲/۲۶	۳/۴۲
Northridge-01	۱۹۹۴	Pacoima Dam (downstr)	۶/۶۹	۷/۰۱	۵۰/۴۰	۰/۴۹	۰/۵۰	۰/۴۴	۳/۳۴
Northridge-01	۱۹۹۴	Pacoima Dam (upper left)	۶/۶۹	۷/۰۱	۱۰۷/۰۷	۱/۳۷	۰/۹۰	۰/۹۲	۴/۲۴
Northridge-01	۱۹۹۴	Rinaldi Receiving Sta	۶/۶۹	۶/۵۰	۱۶۷/۲۰	۰/۸۷	۲/۳۳	۱/۰۴	۱/۷۱
Northridge-01	۱۹۹۴	Sylmar - Converter Sta	۶/۶۹	۵/۳۵	۱۳۰/۲۷	۰/۵۹	۳/۴۸	۲/۹۶	۲/۹۳
Northridge-01	۱۹۹۴	Sylmar - Converter Sta East	۶/۶۹	۵/۱۹	۱۱۶/۵۶	۰/۸۴	۳/۴۹	۳/۰۶	۳/۳۲
Northridge-01	۱۹۹۴	Sylmar - Olive View Med FF	۶/۶۹	۵/۳۰	۱۲۲/۷۲	۰/۷۳	۳/۱۱	۲/۵۸	۲/۶۶
Kobe, Japan	۱۹۹۵	Takarazuka	۶/۹۰	۰/۲۷	۷۲/۶۵	۰/۶۵	۱/۴۳	۱/۱۸	۱/۹۰
Kobe, Japan	۱۹۹۵	Takatori	۶/۹۰	۱/۴۷	۱۶۹/۶۱	۰/۶۸	۱/۶۲	۱/۲۸	۲/۰۰
Kocaeli, Turkey	۱۹۹۹	Gebze	۷/۵۱	۱۰/۹۲	۵۱/۹۶	۰/۲۴	۵/۸۷	۴/۳	۹/۷۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	CHY035	۷/۶۲	۱۲/۶۵	۴۲/۰۵	۰/۲۶	۱/۴۴	۱/۴۸	۱/۵۲
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	CHY101	۷/۶۲	۹/۹۶	۸۵/۴۵	۰/۴۵	۴/۷۷	۵/۵۴	۷/۱۷
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU036	۷/۶۲	۱۹/۸۴	۶۲/۴۳	۰/۱۳	۵/۴۰	۵/۰۶	۱۵/۹۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU046	۷/۶۲	۱۶/۷۴	۴۳/۹۶	۰/۱۴	۸/۵۸	۷/۵۸	۹/۳۶
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU049	۷/۶۲	۳/۷۸	۴۴/۸۲	۰/۲۸	۱۱/۸۳	۹/۳۶	۱۱/۴۴
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU053	۷/۶۲	۵/۹۷	۴۱/۹۰	۰/۲۲	۱۲/۹۴	۹/۵۶	۱۳/۲۶
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU054	۷/۶۲	۵/۳۰	۶۰/۹۲	۰/۱۷	۱۰/۴۷	۷/۵۸	۱۱/۸۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU056	۷/۶۲	۱۰/۵۰	۴۳/۵۳	۰/۱۳	۱۲/۹۲	۵/۰۸	۱۲/۶۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU060	۷/۶۲	۸/۵۳	۳۳/۷۰	۰/۲۱	۱۲/۰۲	۱۰/۱۴	۱۱/۷۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU065	۷/۶۲	۰/۵۹	۱۲۷/۶۸	۰/۸۲	۵/۷۴	۴/۵۴	۵/۰۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU068	۷/۶۲	۰/۳۲	۱۹۱/۱۵	۰/۵۶	۱۲/۱۷	۸/۹۸	۱۲/۲۶
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU075	۷/۶۲	۰/۹۱	۸۸/۴۴	۰/۳۳	۵/۱۵	۴/۴۴	۵/۶۲
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU076	۷/۶۲	۲/۷۶	۶۳/۷۳	۰/۳۰	۳/۹۸	۳/۱۶	۵/۸۴
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU082	۷/۶۲	۵/۱۸	۵۷/۱۲	۰/۲۵	۹/۱۸	۷/۸۴	۱۰/۷۸
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU087	۷/۶۲	۷/۰۰	۵۳/۶۷	۰/۱۰	۹/۰۴	۷/۹۸	۹/۸۸
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU101	۷/۶۲	۲/۱۳	۶۸/۳۹	۰/۲۱	۱۰/۰۴	۹/۶۴	۱۰/۸۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU102	۷/۶۲	۱/۵۱	۱۰۶/۵۷	۰/۲۹	۹/۷۲	۲/۶	۹/۰۴
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU103	۷/۶۲	۶/۱۰	۶۲/۱۸	۰/۱۳	۸/۲۶	۸/۳۴	۷/۹۲
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU104	۷/۶۲	۱۲/۸۹	۳۴/۴۳	۰/۴۴	۱۲/۰۳	۱۰/۶۴	۱۲/۶۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU128	۷/۶۲	۱۳/۱۵	۷۸/۶۶	۰/۱۸	۹/۰۱	۴/۸	۸/۰۰
Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU136	۷/۶۲	۸/۲۹	۵۱/۸۲	۰/۱۶	۱۰/۳۳	۱۲/۹۴	۱۳/۸۲
Chi-Chi, Taiwan-03	۱۹۹۹	CHY024	۶/۲۰	۱۹/۶۵	۳۳/۰۹	۰/۱۹	۳/۱۹	۲/۸۴	۳/۱۸
Chi-Chi, Taiwan-03	۱۹۹۹	TCU076	۶/۲۰	۱۴/۶۶	۵۹/۳۵	۰/۵۲	۰/۹۱	۰/۸۶	۱/۳۴

مقاومت (R) در شکل ۳ آمده است.



شکل (۳) اثر  $T_p$  بر روی نسبت تغییر مکان سازه الاستوپلاستیک کامل در زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه. الف) ضریب کاهش مقاومت ۲ (ب) ضریب کاهش مقاومت ۴ (ج) ضریب کاهش مقاومت ۶

مطابق شکل ۳، اثر  $T_p$  در نسبت تغییر مکان غیرالاستیک بسیار محسوس و چشم‌گیر است. شکل ۳-الف میانگین ۳ گروه از رکوردهای انتخابی برای سازه با ضریب کاهش مقاومت ۲ را نشان می‌دهد که اختلاف چندانی بین نسبت تغییر مکان آن‌ها وجود ندارد، اما برای رکوردهای با  $T_p$  بیشتر از ۴ ثانیه، میزان تغییر مکان بیشینه غیرالاستیک در

#### ۴- نسبت تغییر مکان غیرالاستیک

نسبت تغییر مکان غیرالاستیک به صورت نسبت تغییر مکان بیشینه غیرالاستیک به الاستیک به دست آمده از تحلیل سازه یک‌درجه آزادی با جرم و سختی اولیه یکسان بر اثر زلزله تعریف می‌شود [۱۲]. نسبت تغییر مکان غیرالاستیک برای یک سازه با مقاومت ثابت با معادله زیر تعریف می‌شود:

$$C_R = \frac{S_{di}}{S_{de}} \quad (۳)$$

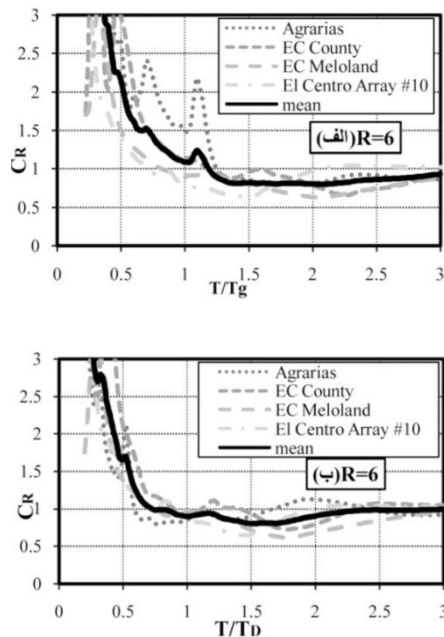
$S_{di}$  بیشترین تغییر مکان غیرالاستیک است که از تحلیل دینامیکی غیرالاستیک یک سازه با ضریب کاهش مقاومت ثابت به دست می‌آید. ضریب کاهش مقاومت به صورت زیر است:

$$R = \frac{F_e}{F_y} \quad (۴)$$

$F_y$  مقاومت جاری شدن و  $F_e$  مقاومت جانبی مورد نیاز برای الاستیک باقی ماندن سازه است.

#### ۵- اثر $T_p$ بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک

پریود همراه پالس سرعت  $T_p$  یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر پاسخ در زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک است. Alavi و Krawinkler [۳، ۴] نشان دادند که رفتار سازه‌های با دوره تناوب بیشتر از  $T_p$  با سازه‌های دارای دوره تناوب کمتر از  $T_p$  بسیار متفاوت است. بنابراین در این بخش تأثیر  $T_p$  بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک بررسی شده است. سه گروه رکورد بر اساس  $T_p$  دسته‌بندی شده است. گروه اول شامل ۴ رکورد با  $T_p$  کمتر از یک ثانیه، گروه دوم شامل ۲۴ رکورد با  $T_p$  بیشتر از یک ثانیه و کمتر از ۴ ثانیه و گروه سوم شامل ۳۳ رکورد با  $T_p$  بیشتر از ۴ ثانیه است. نتایج بدست آمده ارزیابی سه مقدار ضریب کاهش



شکل (۴) نسبت تغییر مکان غیرالاستیک برای ۴ رکورد حوزه نزدیک پالس‌گونه و تأثیر نرمال کردن دوره تناوب. الف) به صورت تابعی از  $T/T_g$  ب) به صورت تابعی از  $T/T_D$

همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود در حالت نرمال شده با  $T_D$  میانگین، نمودارها بهتر از حالت نرمال شده با  $T_g$  روند تغییرات نسبت تغییر مکان غیرالاستیک را نشان می‌دهد. همچنین تأثیر نرمال کردن دوره تناوب با  $T_D$  برای کاهش پراکندگی در دوره تناوب‌های کم، بیشتر از حالتی است که از  $T_g$  استفاده شده است. در نتیجه این‌جا از دوره تناوب نرمال شده با  $T_D$  استفاده شده و مقادیر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک برای ۱۲۰ مقدار  $T/T_D$  به دست آمده است.

## ۷- نتایج مطالعات بر روی نسبت تغییر مکان غیرالاستیک

### ۷-۱- نتایج اصلی مربوط به CR

مقادیر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک برای ضرایب کاهش مقاومت و میانگین آن‌ها در شکل ۵ آمده است. طیف به دست آمده برای میانگین نسبت تغییر مکان غیرالاستیک را

همه‌ی دوره تناوب‌های به دست آمده، بیشتر از تغییر مکان پیشینه الاستیک است.

در شکل‌های ۳-ب و ۳-ج، این افزایش با زیاد شدن ضریب کاهش مقاومت، بیشتر می‌شود به گونه‌ای که در سازه‌های با ضریب کاهش مقاومت ۴ و ۶ این افزایش چشم گیر است. در سازه با ضریب کاهش مقاومت ۴، نسبت تغییر مکان غیرالاستیک برای گروه دوم در دوره تناوب‌های کمتر از ۱/۷۵ ثانیه، بیشتر از گروه اول و برای گروه سوم، برای تقریباً همه‌ی دوره‌های تناوب، بیشتر از گروه اول و دوم است. این نتیجه‌گیری را می‌توان برای سازه با  $R=6$  نیز داشت. این نکات بیانگر آن است که  $T_p$  تأثیر زیادی بر پاسخ سازه‌ها در زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک دارد.

## ۶- دوره تناوب مربوط به بیشترین مقدار سرعت طیفی و تغییر مکان طیفی

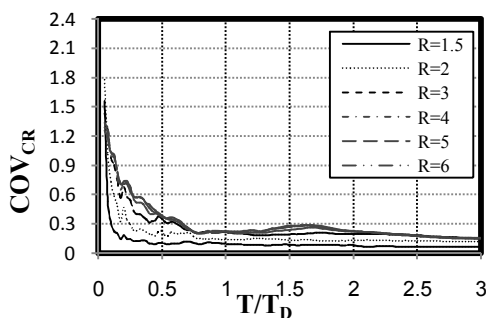
Ruiz-García و Miranda [۱۰] دریافتند که نسبت تغییر مکان غیرالاستیک برای رکوردهای گوناگون، روند ثابت دارد. آن‌ها در مقاله خود برای کاهش پراکندگی داده‌ها، نشان دادند که نرمال کردن دوره تناوب با دوره تناوب نظیر بیشترین مقدار سرعت طیفی ( $T_g$ ) با میرایی ۵ درصد مناسب‌تر است.

در این پژوهش برای کاهش پراکندگی، سه حالت برای نرمال کردن دوره تناوب در نظر گرفته شده است. در حالت اول همانند کارهای Ruiz-García, Miranda [۱۰] از  $T_g$  برای نرمال کردن استفاده شد (شکل ۴-الف). در حالت دوم از  $T_p$  استفاده شد اما به خاطر نامشخص بودن آن در زمان تحلیل سازه‌ها و نبود شناخت کافی برای پیش‌بینی آن، کنار گذاشته شد. در حالت آخر، از دوره تناوب نظیر بیشترین مقدار تغییر مکان طیفی ( $T_D$ ) با میرایی ۵ درصد استفاده شد (شکل ۴-ب).

را نشان می‌دهد. با افزایش سطح تغییر مکان غیرالاستیک (افزایش  $R$ ) ضریب تغییرات ( $COV$ ) نیز افزایش می‌یابد. افزون بر آن، برای  $T/T_D$  کمتر از  $0.25$ ، مقدار  $COV$  بالا است که نشان از پراکندگی زیاد در این بازه دارد. همچنین مقدار  $COV$  و پراکندگی با افزایش  $T/T_D$  به‌ویژه بیشتر از  $0.7$ ، کاهش چشم‌گیری می‌یابد.

### ۷-۳- تأثیر بزرگا و فاصله زلزله

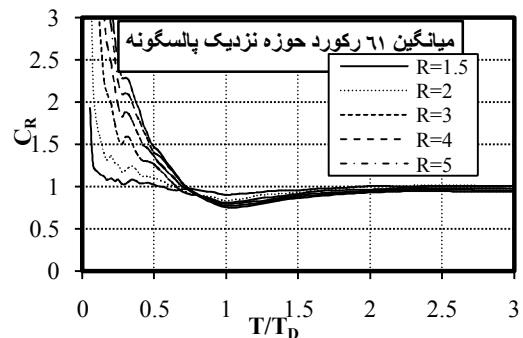
بزرگای زمین‌لرزه رابطه مستقیمی با انرژی آزاد شده از آن دارد. در بخش‌های قبل نیز دیده شد که  $T_p$  بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک تأثیر بسیاری دارد. محققان نشان داده‌اند که می‌توان مقدار  $T_p$  را به بزرگای زلزله ارتباط داد [۱۸].



شکل (۶) ضریب تغییرات نسبت تغییر مکان غیرالاستیک  $T_p$  رکورد زلزله حوزه نزدیک با مقادیر  $R$  ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶

در این بخش به تأثیر بزرگای زلزله بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک پرداخته شده است. برای این هدف از سه گروه رکورد زلزله استفاده شده است: (۱) زلزله با بزرگای ممان کمتر از  $6/5$  شامل ۲۱ رکورد زلزله، (۲) زلزله با بزرگای ممان بیشتر از  $6/5$  و کمتر از ۷، شامل ۱۷ رکورد زلزله و (۳) بزرگای ممان بیش از ۷ که شامل ۲۳ رکورد زلزله می‌شود. نتایج به‌دست آمده از تحلیل در شکل ۷ برای سه ضریب کاهش مقاومت ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود تأثیر بزرگای زلزله چشم‌گیر نبوده و تغییرات یکنواختی ندارد.

می‌توان به سه بازه تقسیم کرد. بازه اول به محدوده دوره تناوب‌های کمتر از  $0.7 T_D$  مربوط می‌شود. در این بازه تغییر مکان بیشینه غیرالاستیک از تغییر مکان بیشینه الاستیک بیشتر است. همچنین با افزایش ضریب کاهش مقاومت، مقدار  $C_R$  افزایش می‌یابد.



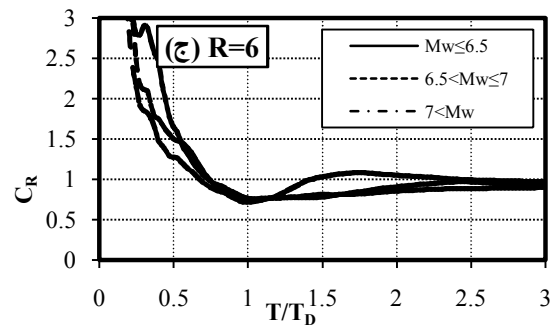
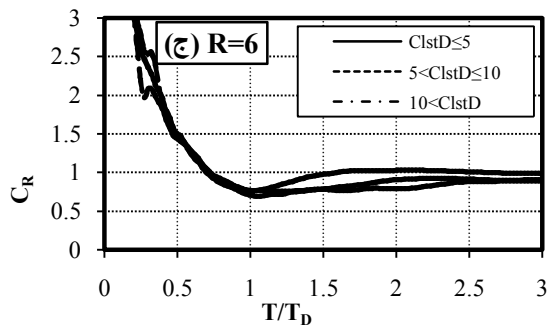
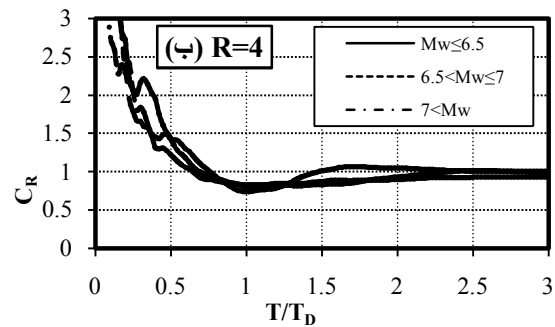
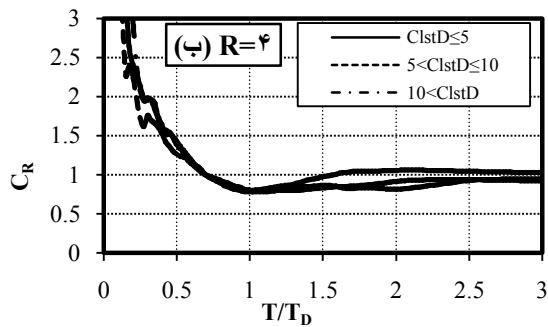
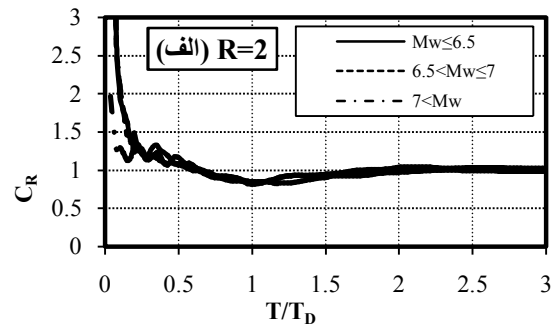
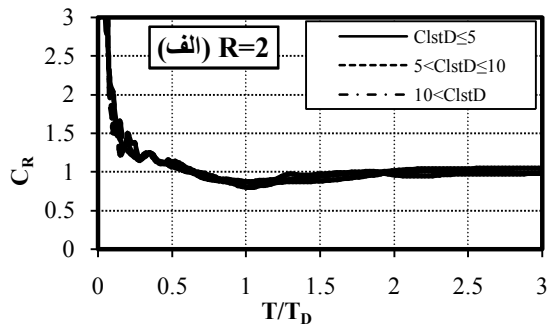
شکل (۵) میانگین نسبت تغییر مکان غیرالاستیک  $T_p$  رکورد حوزه نزدیک پالس‌گونه برای سازه الاستوپلاستیک کامل با ضرایب کاهش مقاومت  $R$  ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶

بازه دوم، محدوده بین دوره تناوب‌های بیشتر از  $0.7 T_D$  و کمتر از  $1 T_D$  است. در این محدوده به‌طور میانگین، تغییر مکان بیشینه غیرالاستیک کمتر از تغییر مکان بیشینه الاستیک است. در بازه سوم که دوره تناوب بیشتر از  $1 T_D$  است، تغییر مکان بیشینه غیرالاستیک و تغییر مکان بیشینه الاستیک تقریباً با هم برابر است. نتایج به‌دست آمده در این بخش از نظر تقسیم بندی نقاط طیفی با نتایج Ruiz-García و Miranda [۱۰] هماهنگی دارد ولی بازه این محدوده‌ها با هم متفاوت است

### ۷-۲- پراکندگی $C_R$

تعیین سطح پراکندگی مقادیر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک اهمیت بسیار دارد. یک پارامتر مؤثر و معمول برای بیان سطح پراکندگی، ضریب تغییرات ( $COV$ ) است. این پارامتر به‌صورت نسبت انحراف استاندارد به میانگین تعریف می‌شود. شکل ۶، ضریب پراکندگی برای مقادیر مختلف  $R$





شکل (۸) تأثیر کوتاه‌ترین فاصله محل ثبت رکورد تا سطح گسیختگی بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک رکوردهای حوزه نزدیک پالس‌گونه. (الف) ضریب کاهش مقاومت برابر ۲ است. (ب) ضریب کاهش مقاومت برابر ۴ است. (ج) ضریب کاهش مقاومت برابر ۶ است.

شکل (۷) تأثیر بزرگای زلزله بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک رکوردهای حوزه نزدیک پالس‌گونه. (الف) ضریب کاهش مقاومت ۲. (ب) ضریب کاهش مقاومت ۴. (ب) ضریب کاهش مقاومت ۶.

#### ۷-۴- تأثیر رفتار هیستریسیس

##### ۷-۴-۱- اثر سخت‌شوندگی بعد از جاری شدن

ابتدایاً در نظر گرفتن رفتار چرخه‌ای مدل چندخطی بدون کاهندگی مقاومت و سختی، اثر سخت‌شوندگی بعد از جاری شدن بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک بررسی شده است. برای این هدف از چهار مدل با نسبت شیب ثانویه به اولیه ( $\alpha$ ) صفر (حالت پلاستیک دلخواه)، سه، پنج و ده

برای بررسی اثر فاصله رکورد، همانند قبل، رکوردها بر اساس فاصله به سه گروه تقسیم شده است: (۱) ۲۲ رکورد کمتر از ۵ کیلومتر (۲) ۲۵ رکورد بیش از ۵ و کمتر از ۱۰ کیلومتر و (۳) ۴ رکورد با فاصله بیش از ۱۰ کیلومتر.

در شکل ۸، نتایج تحلیل سه گروه رکورد برای سه ضریب کاهش مقاومت آمده است. در این شکل، تأثیر کوتاه‌ترین فاصله محل ثبت رکورد تا سطح گسیختگی، ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

سازه الاستوپلاستیک نشان داده شده است. با افزایش ضریب کاهش مقاومت، این نسبت کاهش می‌یابد. همچنین در نسبت  $T/T_D$  کمتر از  $0.7$ ، کاهش این نسبت بسیار سریع است. افزون بر نتایج بالا باید به این نکته نیز اشاره کرد که با توجه به این شکل، با افزایش نسبت  $T/T_D$ ، تأثیر سخت‌شوندگی کاهش می‌یابد. در دوره تناوب‌های بیش از  $2T_D$ ، این نسبت به یک نزدیک می‌شود.

#### ۷-۴-۲- آثار کاهش‌دهی چرخه‌ای

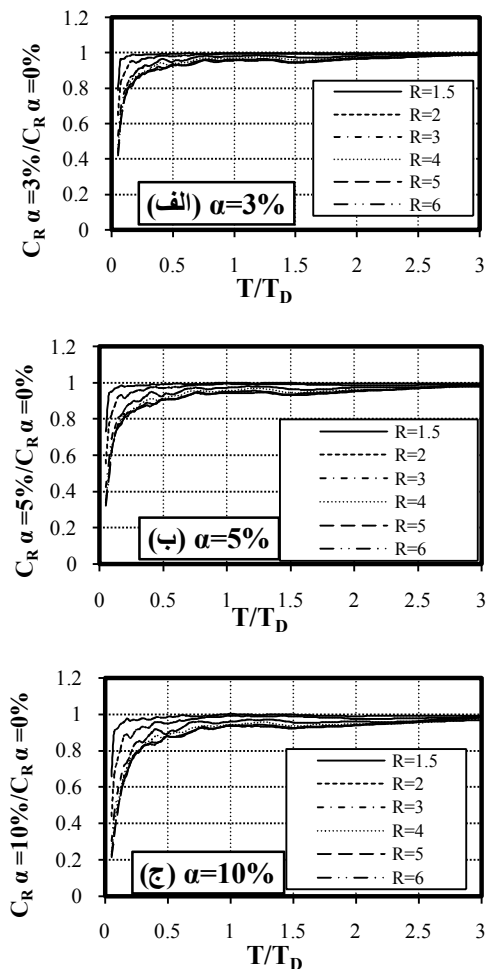
پژوهش روی اثر کاهش‌دهی چرخه‌ای بر نسبت  $C_R$  در زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک [۱۳ و ۱۲]، در مقایسه با زلزله‌های بدون پالس [۲۱ و ۱۹] جامعیت کمتری دارد. در این بخش اثر کاهش‌دهی ناشی از بارگذاری‌های متناوب بر نسبت  $C_R$  در زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک بررسی شده است.

مدل‌های در نظر گرفته شده در این مطالعه به دو گروه تقسیم می‌شوند: (۱) مدل کاهش‌دهی سختی کلاف و (۲) مدل کاهش‌دهی سختی و مقاومت کلاف؛ که در مورد هر دو گروه توضیح داده شد. برای بررسی اثر کاهش‌دهی برای هر رکورد زلزله، هر ضریب کاهش مقاومت و هر دوره تناوب، نسبت تغییرمکان غیرالاستیک برای سازه‌های با کاهش‌دهی، محاسبه شده و نسبت  $C_R$  در سازه با کاهش‌دهی به  $C_R$  در سازه بدون کاهش‌دهی به‌دست آمده است.

مطابق شکل ۱۰-الف، نسبت تغییرمکان غیرالاستیک در دوره تناوب‌های کمتر از  $T_D$ ، در سازه با کاهش‌دهی سختی بیشتر از حالت بدون کاهش‌دهی است و در دوره تناوب‌های بیشتر از  $T_D$ ، این نسبت در سازه‌های با و بدون کاهش‌دهی سختی تقریباً برابر است.

در شکل ۱۰-ب، نسبت  $C_R$  در سازه با کاهش‌دهی سختی و مقاومت به  $C_R$  در سازه بدون کاهش‌دهی نشان داده شده است. با کاهش ضریب کاهش مقاومت، این نسبت افزایش

درصد استفاده شد. برای هر یک از مدل‌ها و هر رکورد براساس ضریب کاهش مقاومت، نسبت تغییرمکان غیرالاستیک با ارزیابی‌های دینامیکی غیرخطی به‌دست آمده است. برای بررسی تأثیر سخت‌شوندگی، نسبت  $C_R$  در سازه‌های با مقادیر  $\alpha = 3\%, 5\%, 10\%$  به سازه در حالت پلاستیک کامل به‌دست آمده است (شکل ۹).



شکل (۹) اثر سخت‌شوندگی بعد از جاری شدن بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک رکوردهای حوزه نزدیک پالس‌گونه. الف) نسبت سخت‌شوندگی (۳٪) ب) نسبت سخت‌شوندگی (۵٪) ج) نسبت سخت‌شوندگی (۱۰٪)

در شکل ۹ نسبت  $C_R$  سازه دارای سخت‌شوندگی به  $C_R$

آمده است. می توان نوشت:

$$\bar{C}_R = f\left(R, \frac{T}{T_D}, \lambda\right) \quad (5)$$

بر اساس مطالب بخش ۷ و شکل تغییرات منحنی میانگین نسبت تغییر مکان غیرالاستیک، رابطه زیر برای برآورد  $C_R$  پیشنهاد شده است:

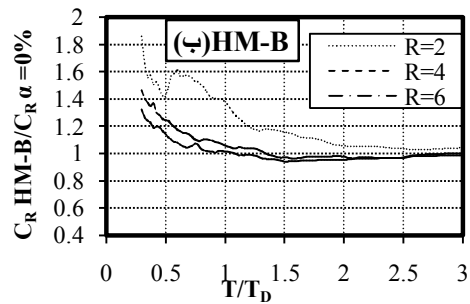
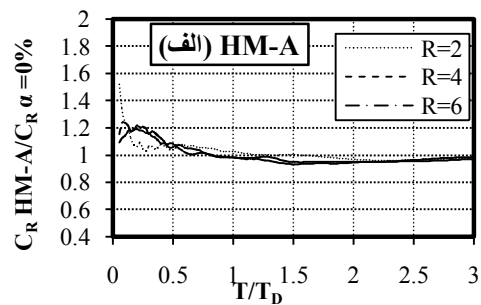
$$\bar{C}_R = a + (R-1) \left[ \frac{b}{\bar{T}} + \frac{c}{(\bar{T})^d} + \frac{e\bar{T}}{\exp\left(5.(\ln(\bar{T}+0.2))^2\right)} \right] \quad (6)$$

$\bar{T}$  برابر  $T/T_D$ ، دوره تناوب،  $T_D$  دوره تناوب نظیر تغییر مکان بیشینه طیفی با میرایی ۵ درصد،  $R$  ضریب کاهش مقاومت و  $a, b, c, d, e$  پارامترهایی است که با استفاده از رگرسیون غیرخطی به دست می آید.

Ruiz-García and Miranda [۹] به این نتیجه رسیدند که اثر نوع خاک ساختگاه روی نسبت تغییر مکان غیرالاستیک در زلزله های بدون اثر جهت گیری قابل چشم گیر نیست. افزون بر آن Changhai و همکاران [۲۲] نیز نتیجه گیری کردند که اثر خاک ساختگاه بر نسبت تغییر مکان غیرالاستیک سازه های با شکل پذیری ثابت در اثر زلزله های با جهت گیری، کم است. پس، اثر نوع خاک ساختگاه در معادله ۶ در نظر گرفته نشده است تا بدون کاهش زیاد دقت، رابطه ساده تری به دست آید. برای انجام رگرسیون غیرخطی از الگوریتم Levenberg-Marquard [۲۳] استفاده شده و مقادیر پارامترها با نرم افزار MATLAB [۲۴] به دست آمده است؛ و مقادیر پارامترهای  $a, b, c, d, e$  برای هر یک از ضرایب کاهش مقاومت بر اساس رگرسیون داده های میانگین در جدول ۲ ارائه شده است.

برای مقایسه داده ها و رابطه پیشنهاد شده در شکل ۱۱، برای سه ضریب کاهش مقاومت، مقادیر میانگین و منحنی

می یابد و در ضریب کاهش مقاومت ۲، در همه ی دوره تناوب ها، نسبت تغییر مکان غیرالاستیک در سازه با کاهندگی، همواره بیشتر از مقدار نظیر خود در سازه بدون کاهندگی است؛ اما با افزایش ضریب کاهش مقاومت در دوره تناوب های بیش از  $1/3 T_D$ ، تغییر مکان غیرالاستیک در سازه با و بدون کاهندگی تقریباً برابر می شود.



شکل (۱۰) نسبت تغییر مکان غیرالاستیک سازه با کاهندگی به سازه بدون کاهندگی برای ضریب کاهش مقاومت ۲، ۴ و ۶ در اثر زلزله های حوزه نزدیک پالس گونه. الف) سازه با مدل کاهندگی سختی کلاف ب) سازه با مدل کاهندگی سختی و مقاومت کلاف

## ۸- رابطه پیشنهاد شده برای محاسبه $C_R$

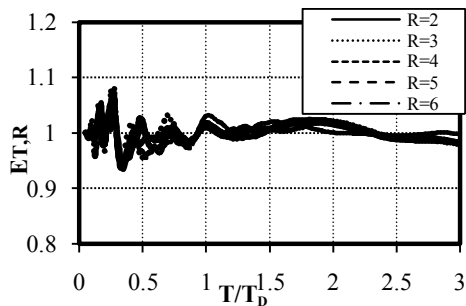
با ارائه یک رابطه برای برآورد نسبت تغییر مکان غیرالاستیک در طراحی به روش تغییر مکان، می توان تغییر مکان بیشینه یک سامانه غیرالاستیک را از تغییر مکان بیشینه یک سامانه الاستیک به دست آورد. در این جا، برای  $C_R$  معادله ای پیشنهاد شده است که تابعی از ضریب کاهش مقاومت  $R$ ،  $T/T_D$  و ضرایب ثابت  $\lambda$  است که از برازش داده ها به دست

FEMA 440 [۲۵]، رابطه‌ای برای خطای میانگین ارائه

کرده که به صورت زیر است:

$$E_{T,R} = \left[ \frac{(\Delta_i)_{app}}{(\Delta_i)_{ex}} \right]_{T,R} \quad (7)$$

این خطا برای هر دوره تناوب و هر ضریب کاهش مقاومت به دست می‌آید. نسبت تغییرمکان غیرالاستیک به دست آمده از روابط ارائه شده و  $(\Delta_i)_{ex}$  نسبت تغییرمکان غیرالاستیک به دست آمده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی است. در این پژوهش نیز از این فرمول برای به دست آوردن خطای میانگین استفاده شده است و در شکل ۱۲ نتایج آن دیده می‌شود.



شکل (۱۲) خطای میانگین به دست آوردن نسبت تغییر مکان غیرالاستیک با استفاده از فرمول ۶

مطابق شکل، اختلاف کمی بین نسبت تغییرمکان غیرالاستیک به دست آمده از رابطه پیشنهاد شده جدید با نظیر خود از تحلیل دینامیکی غیرخطی وجود دارد و برای همه‌ی مقادیر  $\frac{T}{T_D}$  این اختلاف کمتر از ۸ درصد است که بیانگر تقریب بسیار خوب رابطه پیشنهاد شده جدید است.

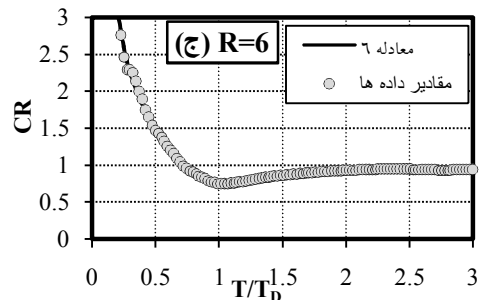
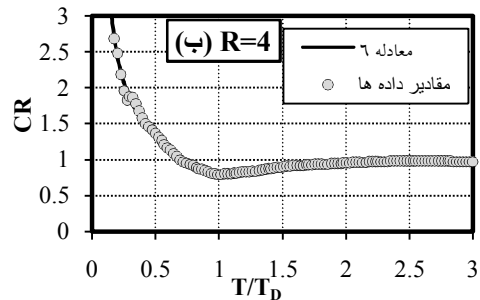
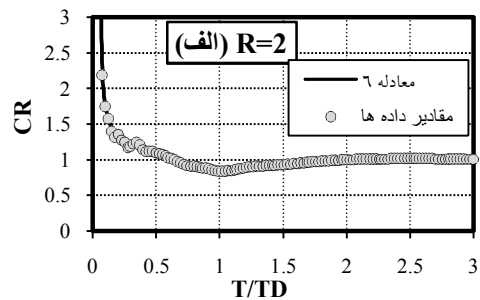
## ۹- نتیجه‌گیری

این پژوهش روی نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سازه‌های در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه نتایج زیر را

به دست آمده از رابطه پیشنهاد شده رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رابطه جدید، مقادیر مناسبی برای میانگین نسبت تغییرمکان غیرالاستیک را ارائه می‌دهد.

جدول (۲) پارامترهای به دست آمده از رگرسیون غیرخطی معادله ۶

پارامترها	R=۲	R=۳	R=۴	R=۵	R=۶
a	۰/۹۸۶۰۰۳	۰/۹۲۴۱۲۹	۰/۸۶۴۲۵۶	۰/۸۲۲۷۰۳	۰/۷۸۴۶۰۳
b	۰/۰۶۸۲۹۶	۰/۰۹۰۹۳	۰/۰۹۳۴۷۵	۰/۰۸۶۶۹۴	۰/۰۸۱۳۰۷
c	۸/۹۹۵۰۰۷	۰/۰۰۳۳۸	۰/۰۰۰۶۴۸	۰/۰۰۱۱۶۲	۰/۰۰۱۰۷۹
d	۴/۸۷۲۶۰۵	۲/۹۶۶۱۰۱	۲/۷۳۳۹۱	۲/۵۴۷۸۸۴	۲/۵۳۹۹۶۹
e	-۰/۲۲۹۵۹	-۰/۱۶۹۲۵	-۰/۱۳۵۲۱	-۰/۱۱۴۶۸	-۰/۱۰۳۰۸



شکل (۱۱) مقایسه نسبت تغییرمکان غیرالاستیک میانگین برای سازه‌های الاستوپلاستیک کامل در اثر زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه و مقادیر به دست آمده از فرمول ۶ و ضرایب به دست آمده در جدول ۲. الف) ضریب کاهش مقاومت ۲ است ب) ضریب کاهش مقاومت ۴ است ج) ضریب کاهش مقاومت ۶ است

به دست آورد:

۱- از مهم‌ترین ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک که بر پاسخ سازه‌ها مؤثر است پیروی همراه پالس سرعت ( $T_p$ ) است. در زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه، در دوره تناوب‌های بیش از  $0.5$  ثانیه با افزایش  $T_p$ ، نسبت تغییرمکان غیرالاستیک افزایش می‌یابد و این افزایش با افزایش ضریب کاهش مقاومت به گونه‌ای چشم‌گیر زیاد می‌شود.

۲- اثر نرمال کردن دوره تناوب با دوره تناوب ( $T_D$ ) نظیر بیشترین مقدار تغییرمکان طیفی با میرایی ۵ درصد نسبت به نرمال کردن با دوره تناوب نظیر بیشترین مقدار سرعت طیفی ( $T_g$ ) با میرایی ۵ درصد، در کاهش پراکندگی داده‌ها، بیشتر است.

۳- با بررسی میانگین نسبت تغییرمکان غیرالاستیک در دوره تناوب‌های کمتر از  $0.7/T_D$ ، تغییرمکان غیرالاستیک از تغییرمکان الاستیک بیشتر است. همچنین با افزایش ضریب کاهش مقاومت، این افزایش بیشتر می‌شود.

۴- در بازه‌ی دوره تناوب‌های  $0.7$  و  $1.7$  برابر  $T_D$ ، به‌طور میانگین تغییرمکان غیرالاستیک، کمتر از تغییرمکان الاستیک است. در این بازه، استفاده از قانون تغییرمکان برابر، تغییرمکان نیاز سازه‌های غیرالاستیک را دست بالا برآورد می‌کند.

۵- در دوره تناوب‌های بیش از  $1.7/T_D$ ، تغییرمکان غیرالاستیک تقریباً برابر تغییرمکان الاستیک است و قانون تغییرمکان برابر در این بازه کارایی دارد.

۶- برای بزرگ‌ها و کوتاه‌ترین فاصله محل ثبت رکورد تا سطح گسیختگی، بزرگ‌ها و فاصله تأثیرزیادی در نسبت تغییرمکان غیرالاستیک ندارد و اختلافات ناچیز است.

۷- نسبت تغییرمکان غیرالاستیک در سازه‌های دارای سخت‌شوندگی بعد از جاری شدن، در مقایسه با سازه‌های الاستوپلاستیک کامل کمتر است و در دوره تناوب‌های کمتر از  $2/T_D$ ، این کاهش زیاد است. اما با افزایش  $T/T_D$ ، این

تغییرات کم شده و به یک میل می‌کند.

۸- در دوره تناوب‌های کمتر از  $T_D$ ، نسبت تغییرمکان غیرالاستیک در سازه با کاهندگی سختی، بیشتر از حالت بدون کاهندگی است. با افزایش دوره تناوب به بیش از  $T_D$ ، مقدار  $C_R$  در دو حالت، تقریباً برابر است.

۹- تأثیر کاهندگی سختی و مقاومت در نسبت تغییرمکان غیرالاستیک چشم‌گیر است و باعث افزایش تغییرمکان غیرالاستیک نیاز در سازه‌های در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه می‌شود. این افزایش با کم شدن ضریب کاهش مقاومت، افزایش می‌یابد.

۱۰- مقایسه میانگین نسبت تغییرمکان غیرالاستیک سازه‌های در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه و مقادیر به‌دست آمده از رابطه پیشنهادی جدید برای محاسبه مقدار میانگین  $C_R$ ، نشان از دقت بالای این رابطه جدید دارد.

## ۱۰- مراجع

- [1] FEMA. "Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings." Report FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
- [2] FEMA. "NEHRP Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures." Report FEMA 450, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2003.
- [3] Alavi, B., Krawinkler, H., "Effects of Near-Fault Ground Motions on Frames Structures." Report 138, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford (CA), 2001.
- [4] Alavi, B., Krawinkler, H., "Behavior of Moment-Resisting Frame Structures Subjected to Near-Fault Ground Motions," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 33, 2004, pp. 687-706.

- [15] Erberik, M. A., "Importance of Degrading Behavior for Seismic Performance Evaluation of Simple Structural Systems, " *Journal of Earthquake Engineering*, No. 15, 2011, pp. 32-49.
- [16] Sivaselvan, M. V., Reinhorn, A. M., "Hysteretic Models For Deteriorating Inelastic Structures, " *Journal of Engineering Mechanics*, No. 126, , 2000 pp. 633-640.
- [17] Baker, J. W., "Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, " *Bulletin of the Seismological Society of America*, No. 97, 2007, pp. 1486-1501.
- [18] Bray, J. D., Rodriguez-Marek, A., "Characterization of Forward-Directivity Ground Motions in the Near-Fault Region, " *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 24, 2004, pp. 815-828.
- [19] Song, J.-K., Pincheira, J. A., "Spectral Displacement Demand of Stiffness- and Strength-Degrading Systems, " *Earthquake Spectra*, No. 16, 2000, pp. 817-851.
- [20] Pekoz, H. A., Pincheira, J. A., "Seismic Response Of Strength And Stiffness Degrading Single Degree Of Freedom Systems, " *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 2004*.
- [21] Chenouda, M., Ayoub, A., "Inelastic Displacement Ratios of Degrading Systems, " *Journal of Structural Engineering*, No. 134, 2008, pp. 1030-1045.
- [22] Changhai, Z., Shuang, L., Lili, X., and Yamin, S., "Study On Inelastic Displacement Ratio Spectra For Near-Fault Pulse-Type Ground Motions, " *Earthquake Engineering And Engineering Vibration*, No. 6, pp. 351-355, 2007.
- [23] Seber, G. A. F., Wild, C. J.; *Nonlinear Regression*, 1th edition, John Wiley & Sons, 2003.
- [24] Mathworks, "MATLAB: The Language of Technical Computing, " version 7.1, The Mathworks Inc, 2010.
- [25] FEMA. "Improvement Of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. " Report FEMA 440, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2005.
- [5] Chopra, A. K., Chintanapakdee, C., "Inelastic Deformation Ratios for Design and Evaluation of Structures: Single-Degree-of-Freedom Bilinear Systems, " *Journal of Structural Engineering*, No. 130, 2004, pp. 1309-1319.
- [6] Miranda, E., "Inelastic Displacement Ratios For Structures On Firm Sites, " *Journal of Structural Engineering*, No. 126, 2000, pp. 1150-1159.
- [7] Miranda, E., "Inelastic Displacement Ratios For Displacement-Based Earthquake Resistant Design, " *12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000*.
- [8] Miranda, E., "Estimation Of Inelastic Deformation Demands Of Sdof Systems, " *Journal of Structural Engineering*, No. 127, 2001, pp. 1005-1012.
- [9] Ruiz-Garcia, J., Miranda, E., "Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, No. 32, 2003, pp. 1237-1258.
- [10] Ruiz-Garcia, J., Miranda, E., "Inelastic Displacement Ratios for Evaluation of Structures Built on Soft Soil Sites, " *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, No. 35, 2006, pp. 679-694.
- [11] Baez, J. I., Miranda, E., "Amplification Factors To Estimate Inelastic Displacement Demands For The Design Of Structures In The Near Field, " *12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000*.
- [12] Akkar, S., U. Yazgan, and P. Gulkan., "Deformation Limits For Simple Non-Degrading Systems Subjected To Near-Fault Ground Motions, " *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 2004*.
- [13] Ruiz-Garcia, J., "Inelastic Displacement Ratios for Seismic Assessment of Structures Subjected to Forward-Directivity Near-Fault Ground Motions, " *Journal of Earthquake Engineering*, No. 15, 2011, pp. 449-468.
- [14] Akkar, S., Kale, Ö., Boore, D.M., Çektimur, E.V., Bas, S., "USDP : Utility Software for Data Processing, " version 1.3.4.21, METU-Earthquake Engineering Research Center, 2011.

## Inelastic Displacement Ratio for Structures Subjected to Pulse Like Near Fault Ground Motions

N. Hassani<sup>1\*</sup>, G. Ghodrati Amiri<sup>2</sup>, M.Bararnia<sup>3</sup>, F.Sinaiean<sup>4</sup>

1- Assistant Prof., Abbaspour College of engineering, Shahid Beheshti University

2- Professor of Elmo-San'at University, Tehran, Iran

3- Ph.D Student., Abbaspour College of engineering, Shahid Beheshti University

4- Assistant Prof. of Building and Housing Research Center, Tehran, Iran

nemathassani@yahoo.com

### Abstract:

In this paper, the results of a statistical study on inelastic displacement ratio for structures subjected to pulse like near fault ground motions are presented. This study is important because the results can be used for evaluating inelastic displacement demand of structures with known lateral stiffness and strength subjected to near fault ground motions. Inelastic displacement ratio is computed from the response of single-degree-of-freedom systems having 6 level of strength reduction factor subjected to 61- pulselike near fault records. The influence of period of vibration normalized by period of peak spectral displacement, strength reduction factor, period associated with velocity pulse  $T_p$ , earthquake magnitude and distance to the source, post-yield stiffness and hysteresis behavior of a structure on inelastic displacement ratios investigated. For more study on the strength and the stiffness degradation effects on inelastic displacement, three type of hysteresis behavior have been considered. The first type is elasto-plastic behavior. Elasto-plastic behavior is generally used to represent the non-degrading hysteretic behavior. Second and the third types are the stiffness degrading and the strength-stiffness degrading hysteretic behavior. Results indicate that strength and stiffness degrading in short period region increases inelastic displacement demands. Further the period associated with velocity pulse plays a main role in inelastic displacement and has a significant effect on it. It is found that strain hardening can reduce inelastic displacement relative to system with perfectly elasto-plastic hysteresis behavior. Magnitude and source to site distance have little effects on inelastic displacement. Finally, a simple equation is proposed for estimating the mean inelastic displacement ratio for structures subjected to pulse like near fault ground motions.

**Keywords:** Near fault ground motions, pulse like, inelastic displacement ratio, displacement demand, stiffness degrading.